

УДК 622.794.25

А.Г. ТРОШИН, канд. техн. наук, **В.Ф. МОИСЕЕВ**, канд. техн. наук,
Н.Г. ПОНОМАРЕВА, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»,
А.Ф. МАЦАК, канд. техн. наук, НПП «Экомаш»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ОСАДКА В ЗОНЕ УПЛОТНЕНИЯ ОСАДИТЕЛЬНОЙ ШНЕКОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ

В статті проведено теоретичне дослідження формування та руху осаду у зоні ущільнення в роторі осаджуючих шнекових центрифуг. Розроблена математична модель дозволяє визначити товщину осаду в зоні ущільнення, час перебування осаду в зоні ущільнення та кутові координати меж зони ущільнення та руху осаду.

The thesis is devoted to research of dehydration process of superfine waste of the chemical industry in sedimentation scroll conveyor centrifuge. Dependences for definition of residence time of sludge in a zone of compression sludge in a sedimentation scroll conveyor centrifuge, effort and capacity on a discharge of sludge are received. The model of process dehydration of superfine waste of the chemical industry in sedimentation scroll conveyor centrifuge which has a zone of compression sludge is offered. This model takes into consideration the structure of moisture in sludge and its distribution of sizes.

Осадительные центрифуги со шнековой выгрузкой осадка находят широкое применение в различных отраслях для разделения суспензий, содержащих твердую фазу с преобладанием частиц размером от 1 до 500 мкм. Технологическими преимуществами этих центрифуг являются: непрерывный процесс разделения, устойчивость работы при колебаниях качественного состава разделяемой суспензии, большая гибкость при выборе параметров процесса. Определенным недостатком этих центрифуг в некоторых случаях является повышенная влажность осадка. Учитывая, что осадок центрифуг зачастую подвергается термической сушке, актуальным является усовершенствование центрифуг с целью снижения энергетических затрат на сушку и уменьшения стоимости процесса обезвоживания в целом.

В настоящее время задача снижения влажности осадка осадительных шнековых центрифуг решается в следующих основных направлениях: подбор оптимальных режимных параметров процесса разделения, совершенствование конструкции осадительных шнековых центрифуг, создание комбинированных центрифуг.

Подбор оптимальных режимных параметров процесса разделения в ос-

новном сводится к подбору частоты вращения ротора и относительного вращения шнека.

При этом преследуются три основные цели:

- обеспечение длительного времени присутствия осадка при максимально возможном факторе разделения;
- обеспечение оптимального заполнения шнекового канала центрифуги осадком, при котором с одной стороны создаются условия для уплотнения осадка, а с другой стороны не нарушается транспорт осадка;
- обеспечение возможности отвода влаги, выделившейся из осадка, по шнековому каналу.

Ограничивающими факторами при выборе частот вращения ротора и шнека являются допустимая частота вращения ротора, допустимый крутящий момент вращения шнека, геометрические параметры шнекового канала.

В условиях колебаний качественного состава разделяемой суспензии подбор оптимальных частот вращения ротора и шнека можно осуществить только с использованием совершенной системы автоматизации.

Данный метод применяется при разделении разбавленных суспензий, образующих с относительно легкие сжимаемые осадки, в частности, при обезвоживании осадков коммунальных сточных вод.

В случае если центрифуга работает в режиме с постоянной максимально возможной производительностью по осадку (ограничивающий фактор – крутящий момент на шнеке), как например, в углеобогащении, данный метод практически не применяется – частота вращения ротора и шнека во время работы центрифуги остаются постоянными.

Пути усовершенствования конструкции осадительных центрифуг направленные на снижение влажности осадка рассмотрены в [1]. Основной идеей многих вариантов конструкций является изменение пути отвода влаги, выделяемой осадком. Вместо обычного пути вдоль спирального шнекового канала, влагу более рационально отводить в направлении вдоль образующей конической части ротора. Для реализации этой идеи предлагалось использовать шнек с разрывом спирали, двухзаходный шнек с различными высотами спирали, специальное покрытие внутренней части ротора и другое. Однако все указанные способы не нашли широкого практического применения. Причиной тому являлась либо низкая эффективность, либо сложность реализации.

Создание комбинированных центрифуг является во многих случаях эффективным способом снижения влажности. В настоящее время достаточно

широко распространены осадительно-фильтрующие центрифуги. Также создаются центрифуги, имеющие два пристыкованных друг к другу осадительных ротора. В одном, цилиндрико-коническом роторе происходит разделение суспензии с образованием осадка, а в другом, коническом, имеющем больший диаметр, происходит отжим осадка [2].

Наличие специализированного участка ротора большого объема безусловно способствует повышению эффективности обезвоживания осадка в данных комбинированных центрифугах. На данном участке реализуются основные требования к режиму обезвоживания: относительно большой фактор разделения и большое время пребывания осадка в роторе. Однако при этом сокращается часть ротора, предназначенная для разделения суспензии. Весь ротор получается громоздкий, а удельные показатели центрифуг не очень высоки.

Учитывая, что время пребывания осадка в роторе ограничивается довольно малым объемом ротора, для снижения влажности высокодисперсных осадков целесообразно в роторе центрифуги осуществить высокоинтенсивное воздействие на осадок. Это воздействие должно быть приложено после стадии отжима под действием центробежных сил. Применительно к конструкции шнековых осадительных центрифуг можно предложить, чтобы оно было сосредоточено в области окон выгрузки осадка.

В соответствии патентом [3] внутри ротора перед окнами выгрузки осадка располагается заслонка, препятствующая свободному движению осадка в окно, а витки шнека на определенном участке, прилегающем к заслонке, имеют неполную высоту. В данном случае осадок, который находится между витком шнека и заслонкой, подвергается сильному сжатию, которое в несколько раз превышает сжатие от центробежной силы или сжатие при обычном транспорте осадка шнеком. Влага, выжимается из осадка, удаляется в направлении вдоль образующей ротора, что также является положительным моментом. Время пребывания осадка в роторе несколько увеличивается, но обычно увеличение времени пребывания не превышает 15 – 20 %.

Для обоснования эффективности применения заслонок, установленных перед окнами выгрузки осадка и выбора их рациональных конструктивных параметров необходимо разработать теоретическое описание движения осадка в области окон.

Целью настоящей статьи является разработка математической модели движения осадка в области окон при наличии заслонок.

Для достижения этой цели на основании проведенных экспериментальных исследований опишем общий характер движения осадка, а затем на основании механики сыпучего тела и допущений о форме валика осадка создадим модель, позволяющую определить толщину осадка и ширину областей уплотнения и движения осадка.

Рассмотрим один из вариантов конструктивной реализации патента [3]. Пусть перед окном выгрузки осадка внутри ротора установлена заслонка высотой h_3 , а на участке осевой длиной H витки шнека полностью отсутствуют.

Нами были проведено экспериментальное исследование центрифуг с установленными заслонками (центрифуги ОГШ-750, ОГШ-450, ОГШ-460, ОГШ-320). В центрифугах разделялись различные водные суспензии: антрацита, каменного угля, мела, глины, высокодисперсного кремния, гидроокиси титана и др. Наблюдения за формой осадка проводились следующим образом. Центрифуга работала на определенной производительности. В определенный момент времени производили остановку относительного вращения шнека и прекращение подачи суспензии. Затем отключали привод ротора центрифуги.

После остановки вращения ротора осадок, находящийся в области выгрузочных окон и в шнековом канале в пределах одного витка был доступен для непосредственного осмотра (рис. 1).

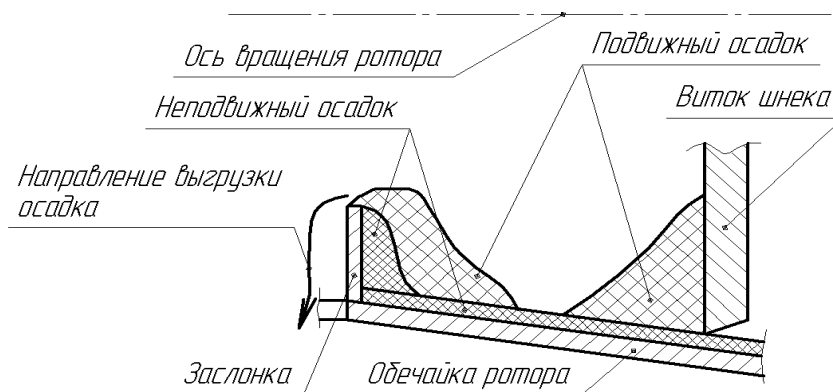


Рис. 1. Подвижный и неподвижный валики осадка

Валик осадка перед витком шнека имел треугольное или трапециевидальное сечение, что соответствует общепринятым положениям [2].

Размер и форма валика осадка зависят от свойств осадка, производительности, частоты относительного вращения шнека.

Непосредственно перед заслонкой располагался неподвижный осадок, который жестко сцепляется с заслонкой и со стенкой ротора и не выгружается из ротора. Форма валика неподвижного осадка зависит от физико-механических свойств: коэффициента внутреннего трения и от сцепления между частицами.

Также между заслонкой и витком шнека располагался подвижный (выгружаемый) осадок. Форма валика этого осадка зависит не только от свойств осадка, но и от режима работы центрифуги, местоположения осадка в области выгрузочных окон.

Для задания расположения элементарного объема осадка в области выгрузочных окон введем полярную систему координат с центром на оси вращения ротора. Плоскость отсчета полярного угла φ перпендикулярна оси вращения ротора. Начало отсчета полярного угла φ соответствует началу последнего витка спирали шнека. Значение полярного угла $\varphi = 2\pi$ соответствует окончанию спирали шнека (рис. 2).

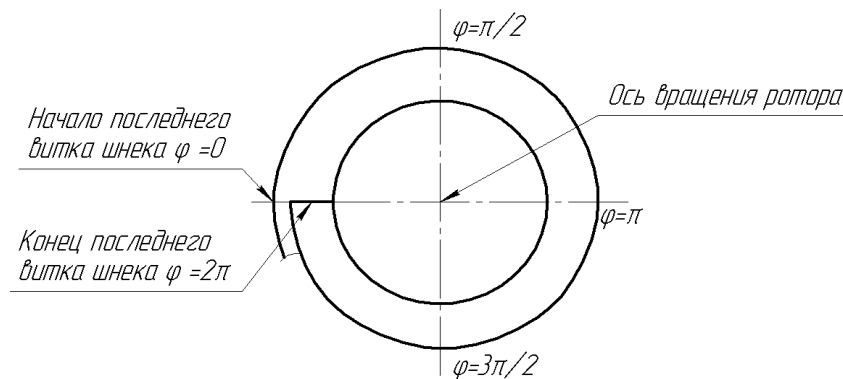


Рис. 2. Полярная система координат

Опишем изменение формы осадка, находящегося между поверхностью витка шнека и поверхностью заслонки.

При разработке математической модели будем руководствоваться следующими допущениями:

- образующая ротора в области окон выгрузки осадка параллельна оси вращения ротора;
- образующая спирали шнека перпендикулярна оси вращения ротора;
- материал осадка – сыпучее тело.

При $\varphi=0$ осадок будет в виде двух валиков (рис. 3). Один валик, перед витком спирали шнека, имеет треугольное сечение, а другой, возле заслонки, имеет сечение близкое к трапециевидальному.

Площадь поперечного сечения валика осадка, прилегающего к шнеку, м^2

$$S_{\text{с}} = \frac{G_{\text{ос}}}{\rho_{\text{ос}} \cdot r \omega_{\text{ш}}} \quad (1)$$

где $G_{\text{ос}}$ – производительность центрифуги по осадку, кг/с ; $\rho_{\text{ос}}$ – плотность осадка, кг/м^3 ; r – радиус ротора в области окон выгрузки, м ; $\omega_{\text{ш}}$ – угловая скорость относительного вращения шнека

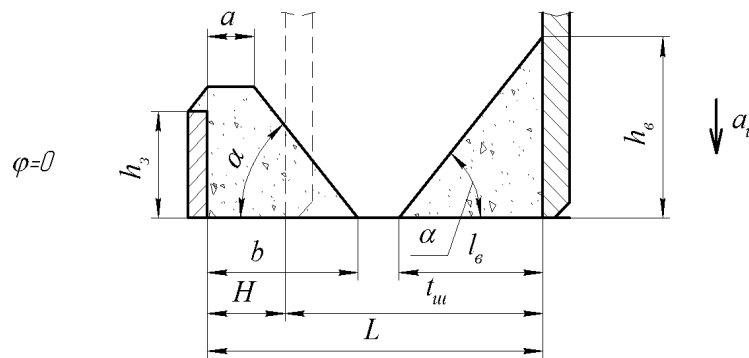


Рис. 3. Форма валиков осадка до их касания

Принимая треугольную форму валика осадка, можно определить его высоту $h_{\text{с}}$ и длину в осевом направлении $l_{\text{с}}$:

$$h_{\text{с}} = \sqrt{2S_{\text{с}} \text{tg} \alpha}, \quad l_{\text{с}} = \sqrt{2S_{\text{с}} / \text{tg} \alpha} \quad (2)$$

Нижнее основание трапеции можно определить, зная ее площадь и задавшись её высотой.

$$b = \left(S + \frac{h^2 \text{tg} \alpha}{2} \right) / h \quad (3)$$

Расстояние от заслонки до сечения витка шнека изменяется в соответствии с уравнением:

$$\frac{dL}{d\varphi} = -\frac{t_{uu}}{2\pi}, \quad (4)$$

а при начальных условиях

$$L(0) = t_{uu} + H. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (4) приводит к зависимости:

$$L(\varphi) = H + t_{uu} \left(1 - \frac{\varphi}{2\pi} \right) \quad (6)$$

Изменение величины L означает, что валик осадка, находящийся перед шнеком, движется в сторону выгрузки. В определенный момент он коснется валика осадка перед заслонкой. Это произойдет при условии, что $L = b + l_g$.

Приравниваем это выражение с правой частью уравнения (6):

$$b + l_B = H + t_{uu} \left(1 - \frac{\varphi}{2\pi} \right). \quad (7)$$

Из уравнения (7) определим угловую координату касания валиков:

$$\varphi_{кас} = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{l_g + b - H}{t_{uu}} \right) \quad (8)$$

После касания валиков начинается зона вспучивания и уплотнения осадка. Между валиками образовывается перешеек толщиной h_n .

Вспучивание сыпучего материала осадка будет сосредоточено в области перешейка (рис. 4).

Изменение толщины перешейка будет происходить в соответствии с уравнением:

$$\frac{dh_n}{d\varphi} = -\frac{dL}{d\varphi} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (9)$$

При достижении определенной «критической» толщины перешейка, прочность его возрастет настолько, что вспучивание прекратится, и начнется движение всего осадка в сторону выгрузки. Для оценки «критической» тол-

щины слоя осадка в работе [4] было предложено уравнение, позволяющее задачу механики сыпучего тела свести к рассмотрению геометрических характеристик осадка: $h_{кр} = \sqrt{h_{мин}^2 + h_{мин} h}$, где h – толщина слоя движущегося осадка (соответствует толщине валика осадка перед заслонкой); $h_{мин}$ – минимальная устойчивая толщина слоя движущегося осадка. В нашем случае в качестве оценки для минимально возможной толщины можно принять $h_{мин} \approx h_3$.

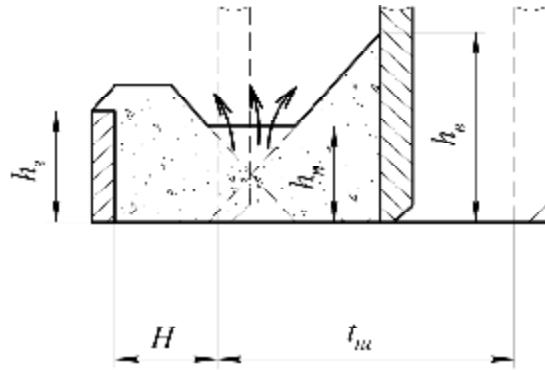


Рис. 4. Зона вспучивания – уплотнения осадка

Подставляя уравнение (5) в (9) проводя интегрирование по h_n в пределах от 0 до $h_{кр}$, а по углу φ в пределах от $\varphi_{кас}$ до $\varphi_{выгр}$, определим угловую координату начала зоны выгрузки осадка (рис. 5):

$$\varphi_{выгр} = \frac{h_{кр} + \varphi_{кас} t_{из} \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2\pi}{t_{из} \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2\pi} \quad (10)$$

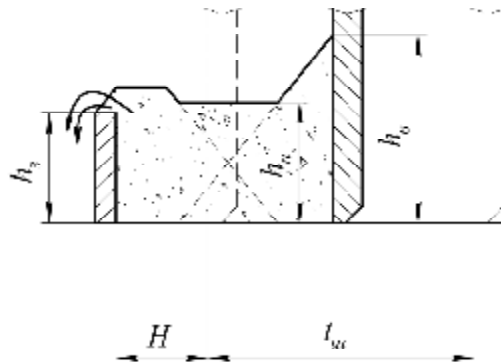


Рис. 5. Зона выгрузки осадка

Если производительность по осадку мала, то может оказаться, что

$h_{кр} > h_6$. В этом случае вспучивание осадка в области «перешейка» продолжится по уравнению (9) до достижения высоты h_6 .

Это произойдет при:

$$\varphi' = \frac{2\pi h_6}{t_{uu} \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \varphi_{кас}. \quad (11)$$

После этого можно принять, что незаполненное пространство перед витком шнека в осевом сечении будет иметь форму трапеции. Вспучивание осадка приведет к дальнейшему росту толщины перешейка и уменьшению площади трапеции:

$$\frac{dS_n}{d\varphi} = h \frac{dL}{d\varphi} = -h \frac{t_{uu}}{2\pi} \quad (12)$$

После этого можно принять, что незаполненное пространство перед витком шнека в осевом сечении будет иметь форму трапеции. Вспучивание осадка приведет к дальнейшему росту толщины перешейка и уменьшению площади трапеции:

$$\frac{dS_n}{d\varphi} = h \frac{dL}{d\varphi} = -h \frac{t_{uu}}{2\pi} \quad (13)$$

Интегрирование уравнения (13) приводит к выражению:

$$S_n = S_n' - h \cdot \frac{t_{uu}}{2\pi} \cdot (\varphi - \varphi') \quad (14)$$

где S_n' это значение площади трапеции при $\varphi = \varphi'$.

С другой стороны, исходя из геометрических соображений, площадь трапеции можно определить как

$$S_n = (L(\varphi) - a) \cdot (h - h_n) - \frac{(h - h_n)^2}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (15)$$

где h_n высота перешейка осадка перед витком шнека.

Чтобы по уравнению (15) определить S'_n , надо сделать подстановки $\varphi = \varphi'$, $h_n = h_\epsilon$.

В момент начала движения осадка на выгрузку (при $\varphi = \varphi_{\text{выгр}}$) толщина перешейка достигнет критического значения $h_n = h_{\text{кр}}$. Решая совместно уравнения (14) и (15) определим угловую координату начала зоны выгрузки осадка при $h_{\text{кр}} > h_\epsilon$:

$$\varphi_{\text{выгр}} = 2\pi \left(\frac{(h - h_{\text{кр}})^2 / 2 \operatorname{tg} \alpha - (H + t_{\text{ш}} - a) \cdot (h - h_{\text{кр}}) + S'_n}{h_{\text{кр}} t_{\text{ш}}} + \frac{\varphi' h}{h_{\text{кр}}} \right) \quad (16)$$

Принимая, что осадок в зоне непосредственно близкой к шнеку не деформируется в области $\varphi_{\text{выг}} \leq \varphi \leq 2\pi$, количество осадка, остающегося в зоне уплотнения, можно определить следующим образом:

$$S'_3 = Hh_3 + \frac{1}{2} \cdot \frac{(h_\epsilon - h_{\text{кр}})^2}{\operatorname{tg} \alpha} \text{ при } H > \frac{h_\epsilon - h_{\text{кр}}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (17)$$

$$S'_3 = Hh_3 + \frac{1}{2} \cdot H^2 \operatorname{tg} \alpha \text{ при } H < \frac{h_\epsilon - h_{\text{кр}}}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (18)$$

Как видно, изменение площади осадка описывается системой нелинейных алгебраических уравнений (1) – (18), причем, некоторые функции, входящие в эту систему, имеют разрывы производной. Поэтому решение данной системы уравнений проводилось численным способом, методом итерационных вычислений: вначале задавались величиной S_3 – площадь сечения валика осадка, оставшегося перед заслонкой в конце зоны выгрузки, а затем, проводя расчет по указанным формулам, определяли новое значение S'_3 . Затем подбирали значение S_3 так, чтобы минимизировать: $(S_3 - S'_3)^2$. Задача оптимального поиска была реализована в среде MS EXCEL при помощи надстройки «Поиск решения», с использованием метода Ньютона.

Исходными данными для проведения расчета являются производительность по осадку, кг/с, $G_{\text{ос}}$; частота относительного вращения шнека, с^{-1} , $n_{\text{ш}}$; плотность осадка, кг/м^3 ; угол естественного откоса осадка α ; диаметр рото-

ра, м, D_o ; шаг шнека, м, $t_{ш}$; расстояние от заслонки до начала спирали шнека, м, H ; высота заслонки, м, h_3 .

Для оценки высоты трапеции площадью S_3 принималось: $h = S_3 / H$.

При обработке результатов расчета, необходимо было получить зависимости, которые не зависели бы от конкретных величин: производительности, частоты вращения шнека, плотности осадка, абсолютных значений шага шнека, высоты заслонки, ширины зоны уплотнения, высоты валика осадка.

Исходя из этого, предлагаются и определены расчетным путем следующие зависимости.

На рис. 6 показана зависимость безразмерной площади сечения валика осадка перед заслонкой от безразмерной производительности $S_3 / H \cdot h_3 = f(S_B / H \cdot h_3)$ при различных значениях относительной высоты заслонки h_3 / H .

Как видно при наименьших значениях относительной производительности $S_B / H \cdot h_3$ (до 0,5) безразмерная площадь осадка мало зависит от производительности. Затем в диапазоне значений $S_B / H \cdot h_3$ 0,5÷2,5 наблюдается нелинейный рост площади осадка перед заслонкой, после чего она практически не изменяется.

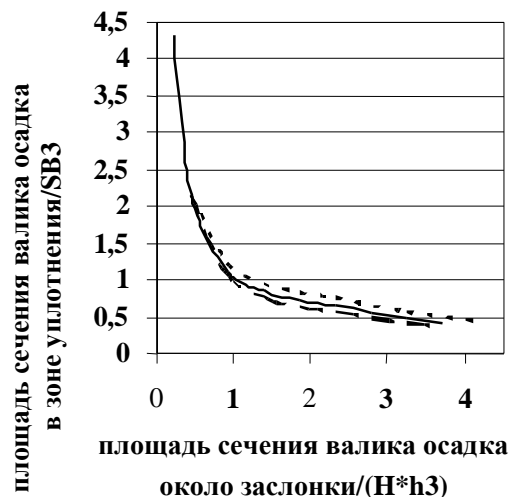
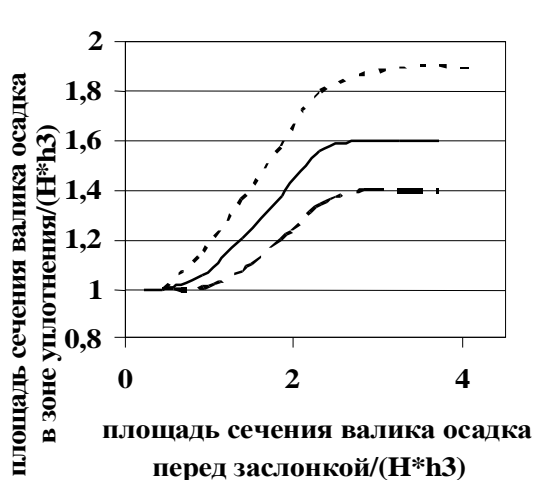
Данная зависимость позволяет определять высоту слоя осадка h , учитывая, что $S_3 / H \cdot h_3 \approx h / h_3$.

Для определения времени пребывания осадка в зоне уплотнения может использоваться зависимость вида $\frac{S_3}{S_B} = f\left(\frac{S_B}{H \cdot h_3}\right)$ – зависимость безразмерного времени пребывания от безразмерной производительности при различных соотношениях h_3 / H (рис. 7). При этом время пребывания, выражаемое в виде соотношения S_3 / S_B , фактически соответствует количеству оборотов шнека, необходимых для обновления осадка в зоне уплотнения.

Как показывает зависимость (рис. 7) время пребывания в зоне уплотнения, при обычных значениях относительной производительности $1 < S_B / H \cdot h_3 < 4$ соответствует 0,5...1 периоду относительного вращения шнека.

Это означает, что влияние зоны уплотнения на общее время пребывания осадка в центрифуге относительно невелико и эффект снижения влажности

достигается не за счет повышения времени пребывания, а за счет дополнительного механического уплотнения.



— $h_3/H=1$ - - - $h_3/H=0,67$ — — — $h_3/H=1,5$

Рис. 6. Зависимость площади сечения валика осадка перед заслонкой от площади валика осадка перед шнеком

Рис. 7. Зависимость времени пребывания осадка в зоне уплотнения от безразмерной производительности

Однако при очень низких значениях относительной производительности $0.25 < S_B / H \cdot h_3 < 0.5$ можно добиться резкого увеличения времени пребывания и очевидно, время пребывания будет ощутимо влиять на результаты обезвоживания.

Список литературы: 1. Пономарева Н.Г. Направления усовершенствования процесса обезвоживания полидисперсных материалов в осадительных центрифугах со шнековой выгрузкой осадка / Н.Г. Пономарева, А.Г. Трошин, В.Ф. Моисеев. // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 26. – С. 150 – 156. 2. Борц М.А. Шнековые осадительные центрифуги для угольной промышленности / М.А. Борц, Ю.Н. Бочков, Л.С. Зарубин. – М.: Недра, 1970. – 452 с. 3. Пат. 39811, UA, МПК В04В 3/00. Центрифуга з безперервним вивантаженням осаду / Трошин О.Г., Пономарева Н.Г. – № 200812588; заявл. 27.10.2008; опубл. 10.03.2009, бюл. №5, 2009 р.. 4. Трошин А.Г. К уточнению расчета критической толщины слоя осадка в центрифугах непрерывного действия с принудительной выгрузкой / А.Г. Трошин, Н.Г. Пономарева, А.Ф. Мацак // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 47. – С. 123 – 131.

Поступила в редколлегию 05.04.10